

УДК 621.318

А.В.Гнатов

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

ИНДУКТОРНАЯ СИСТЕМА ИЗ ЧЕТЫРЁХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВИТКОВ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ РАЗДАЧИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРУБ

В работе проведены исследования пространственного распределения электромагнитного поля, которое создаётся индукторной системой из четырех прямоугольных витков, предназначенных для «раздачи» полых металлических труб с прямоугольной формой поперечного сечения. Определены возбуждаемые электродинамические усилия.

Ключевые слова: индукторная система, токопровод, магнитно-импульсная раздача, магнитное давление, напряжённость электрического поля.

Введение

Постановка проблемы. Ведущими автомобильными фирмами Европы (например, «Фольксваген») инициированы разработки новых технологических процессов по сочленению элементов несущих рамных конструкций автомобилей [1].

Анализ основных достижений и публикаций Известные методы традиционной сварки оказываются неэффективными или вообще неработоспособными [1, 2]. Но, как показали проведенные исследования, магнитно-импульсные технологии позволяют реализовать на практике не только «холодную сварку», но и так называемую «раздачу» полых металлических труб, позволяющую жёсткое соединение сочленяемых элементов [3, 4]. Вопросы, связанные с операцией «раздачи», как оказалось, проработаны не достаточно и требуют, в первую очередь, теоретического анализа.

Цель настоящей работы – теоретические и экспериментальные исследования пространственного распределения возбуждаемых полей и электродинамических усилий в индукторной системе из четырех прямоугольных витков, предназначенной для "раздачи" полых металлических труб с прямоугольной формой поперечного сечения, применяемых в рамных конструкциях автомобилей.

Поле и давления, расчётные соотношения

Рассматриваемая индукторная система иллюстрируется нижеприведенными схемами: на рис.1а показано её изображение в поперечном сечении, а на рис.1б – взаимное пространственное расположение витков и протекающих токов.

Примем следующие допущения.

- Углы поперечного профиля в изгибах полой металлической трубы приближаются к $\approx \frac{\pi}{2}$.
- Приемлема декартова прямоугольная система координат.
- Одновитковые соленоиды прямоугольной формы (рис. 1а) выполнены из проводников квадратного сечения $d \times d$ и обладают достаточно большой протяжённостью в измерении, соответствующем оси ОХ, так что $\frac{\partial}{\partial x} = 0$.
- Электропроводность обрабатываемого металла и действующие рабочие частоты настолько высоки, так что приемлемо приближение резкого поверхностного эффекта;
- По токопроводам витков, параллельных оси ОХ, протекает один и тот же по величине ток $I_x(t) = I(t)$ (t – время в сек.).

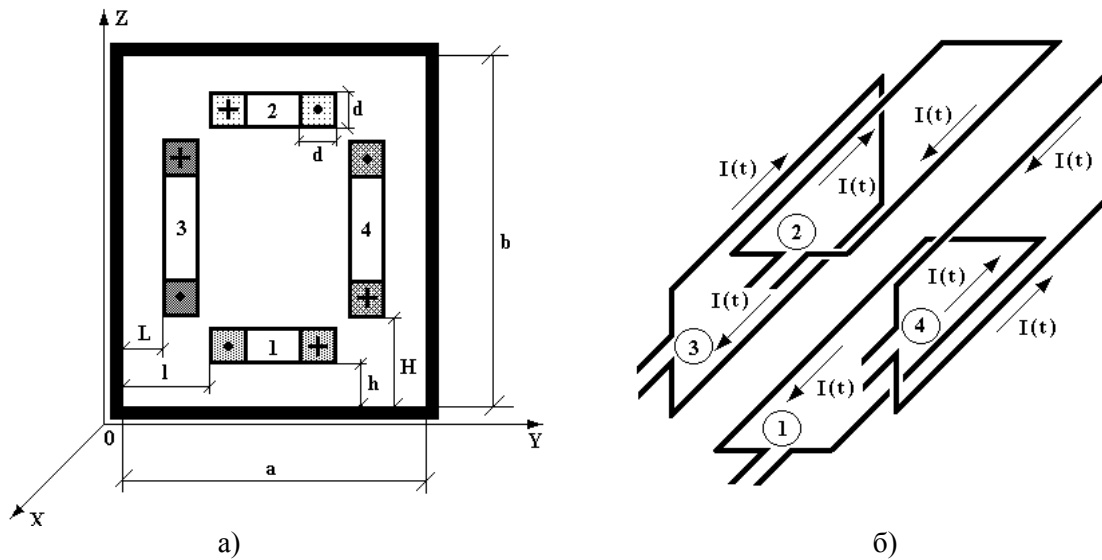


Рис.1. Схематическое изображение 4-хвитковой индукторной системы для "раздачи" прямоугольного металлического профиля, а) геометрия в поперечном сечении; 1,2,3,4 – одновитковые прямоугольные соленоиды, плоскости которых компланарны плоскостям внутренней полости профиля; б) взаимное расположение витков индукторной системы

Принятые допущения позволяют считать, что в рассматриваемой системе возбуждаются не-тривиальные компоненты вектора напряжённости электромагнитного поля:

$$E_x(t, y, z) \neq 0, H_y(t, y, z) \neq 0, H_z(t, y, z) \neq 0.$$

Из условия резкого поверхностного эффекта следует, что на поверхностях стенок металлической трубы касательная составляющая вектора напряжённости электрического поля обращается в нуль, то есть $E_x(t, y, \{z = 0, b\}) = E_x(t, \{y = 0, a\}, z) = 0$.

Запишем уравнения Максвелла для компонент вектора поля, преобразованных по Лапласу с учётом нулевых начальных условий.

В полости между взаимно ортогональными стенками металлической трубы ($y \in [0, a], z \in [0, b]$) система L -образов дифференциальных уравнений принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z), \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z), \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z), \end{array} \right. \quad (1)$$

где p – параметр интегрального преобразования Лапласа, $j_x(p, y, z)$ – плотность стороннего тока

- тока в токопроводах индуктора, $j_x(p, y, z) = \left(\frac{I(p)}{d^2} \right) \cdot \sum_{i=1}^4 \delta_i \cdot f_i(y, z)$, $I(p) = L\{I(t)\}$, δ_i – множитель, определяющий направление тока в каждом витке индуктора ($i = 1, 2, 3, 4$), $\delta_i = +1$, соответствует «положительному» направлению тока, $\delta_i = -1$, соответствует «отрицательному» тока, $f_i(y, z)$ – функции пространственного распределения плотности токов по виткам индуктора ($i = 1, 2, 3, 4$),

Из дифференциальной системы (1 – 3) можно получить уравнение для $E_x(p, y, z)$:

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = p\mu_0 j_x(p, y, z). \quad (4)$$

Правая часть (4) есть линейная комбинация из четырёх слагаемых. Для интегрирования данного линейного неоднородного дифференциального уравнения целесообразно воспользоваться принципом суперпозиции, в соответствии с которым следует найти решения для каждого из слагаемых в его правой части, после чего полученные результаты суммируются.

Чтобы найти компоненты напряжённости магнитного поля (y, z – составляющие магнитного поля), необходимо найденные выражения для $E_x(p, y, z)$ (для каждого витка) подставить в уравнения (2) и (3). Опуская промежуточные выкладки, записываем:

$$H_y(p, y) = \left(\frac{16 \cdot I(p)}{\pi \cdot b d^2} \right) \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{\pi \cdot m}{b} z\right) \sin\left(\frac{\pi \cdot n}{a} y\right) \cdot F(m, n)}{\left[\left(\frac{\pi \cdot m}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot n}{a}\right)^2 \right] \cdot n}, \quad (5)$$

где $F(m, n) = (1 + (-1)^m) \cdot (1 + (-1)^n) \cdot \sin\left(\frac{\pi m}{b} \cdot \frac{d}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{b} \cdot \frac{d}{2}\right) \times$
 $\times \left[\sin\left(\frac{\pi m}{b} \left(h + \frac{d}{2}\right)\right) \sin\left(\frac{\pi n}{a} \left(H + \frac{d}{2}\right)\right) + \sin\left(\frac{\pi m}{b} \left(H + \frac{d}{2}\right)\right) \sin\left(\frac{\pi n}{a} \left(h + \frac{d}{2}\right)\right) \right].$

$$H_z(p, z) = - \left(\frac{16 \cdot I(p)}{\pi \cdot a \cdot d^2} \right) \sum_{m,n=1}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{\pi \cdot n}{a} y\right) \sin\left(\frac{\pi \cdot m}{b} z\right) \cdot F(m, n)}{\left[\left(\frac{\pi \cdot m}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot n}{a}\right)^2 \right] \cdot m}. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) полностью описывают пространственно-временные распределения касательных компонент напряжённости магнитного поля, а в условиях резкого поверхностного эффекта и плотности индуцированных токов, возбуждаемых индуктором из четырёх взаимно ортогональных прямоугольных одновитковых соленоидов.

Следует отметить, что в квадратных скобках выражения для $F(m, n)$ первое алгебраическое слагаемое соответствует вкладу горизонтальной, второе – вертикальной пары витков.

Численные оценки

Полученные формулы проиллюстрируем численными расчётами для индукторной системы, с помощью которой было проведено экспериментальное моделирование процессов возбуждения электромагнитных полей токами 4-х одновитковых соленоидов в полости прямоугольной трубчатой заготовки.

Постановка задачи. В режиме резкого поверхностного эффекта обработке подлежит полая протяжённая алюминиевая трубчатая заготовка толщиной $0,001 \text{ м}$ с квадратной формой поперечного сечения: $0,02 \text{ м} \times 0,02 \text{ м}$, $a = b = 0,02 \text{ м}$.

Индукторы – одновитковые соленоиды прямоугольной формы выполнены из проводников с квадратным поперечным сечением: $0,002 \text{ м} \times 0,002 \text{ м}$, $d = 0,002 \text{ м}$. Геометрически, расположение индукторов соответствует рис. 1: $h = L = 0,001 \text{ м}$, $H = l = h + d + \Delta$, Δ – расстояние между смежными токопроводами витков индуктора. Параметр Δ в расчётах будет варьироваться. Его величина в отношении к характерным размерам системы должна определять вид картины пространственного распределения полей. Реально же данный параметр определяется толщиной изоляции токопроводов.

Вычислить: распределения касательных компонент напряжённости магнитного поля, а следовательно и распределения плотности вихревых токов, индуцированных в металле полой трубы на её горизонтальных и вертикальных стенках.

Расчёт. Как было указано выше, требуемые характеристики электромагнитных процессов в исследуемой индукторной системе вычисляются по формулам (5) и (6).

Результаты вычислений для идеального случая $\Delta = 0$ (смежные витки максимально близки друг к другу) представлены графическими зависимостями на рис. 2.

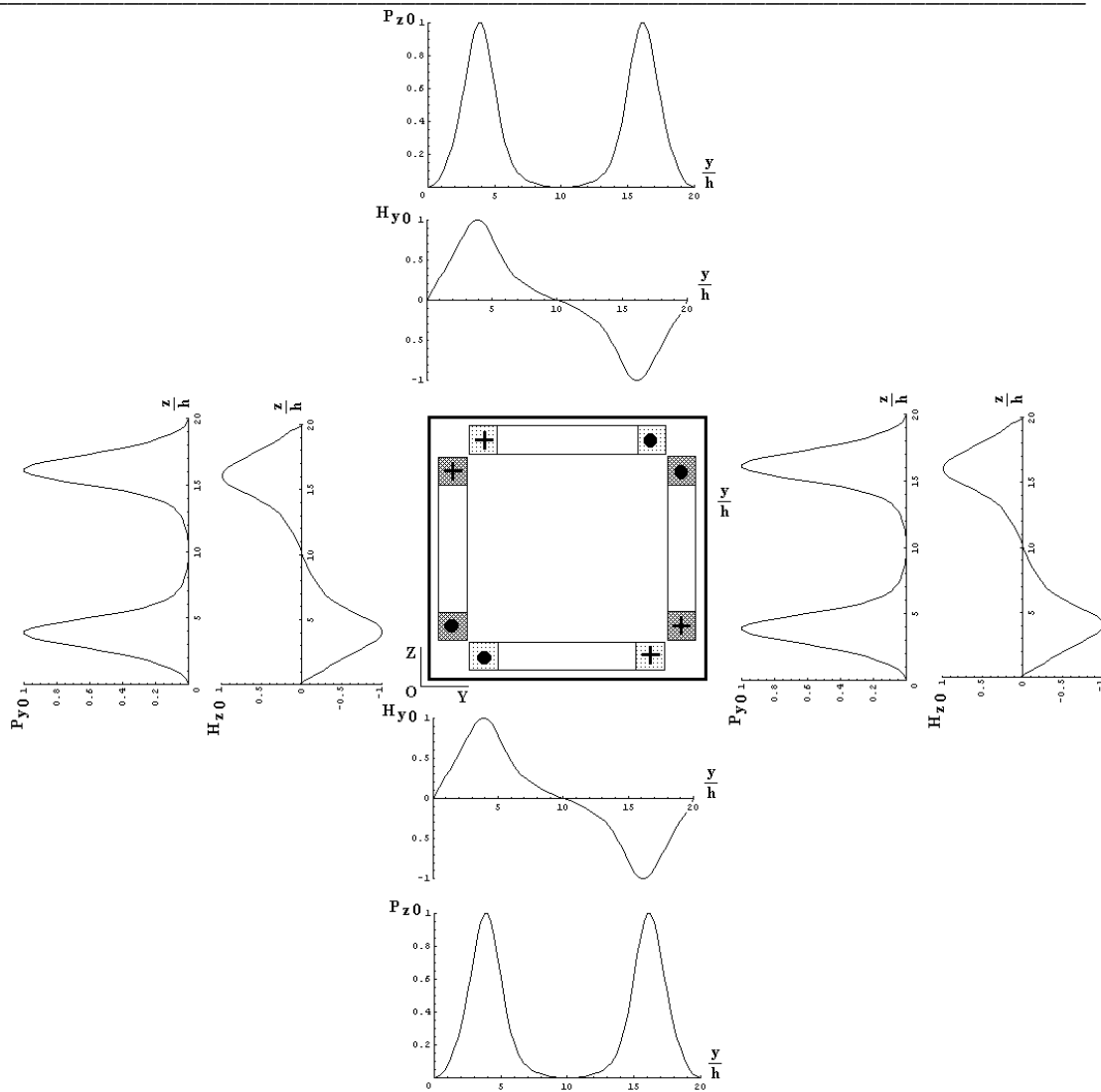


Рис. 2. Пространственные распределения касательных компонент напряжённости магнитного поля ($H_{y,z}^0$) и возбуждаемых сил давления ($P_{z,y}^0$) в относительных единицах при включении всех 4-х витков (нормировка производилась на максимум расчётной величины)

Для более полной иллюстрации процессов в системе расчёты в относительных единицах следует дополнить абсолютными значениями характеристик. Так, при амплитуде тока в индукторе $I_m \approx 100 \text{ \AA}$ максимум напряжённости будет составлять $H_m \approx 1,96 \cdot 10^7 \text{ \AA}/\text{м}$, соответственно, максимум развиваемого давления будет равен $P_m \approx 2,42 \cdot 10^8 \text{ \AA}^2/\text{м}^2$.

Экспериментальная проверка вычислений

При проведении модельных экспериментов источником мощности служил генератор синусоидального тока с рабочей частотой в диапазоне $5 \div 45 \text{ кГц}$ – Powertron 80S и осциллограф – Tektronix TDS 2014 с набором датчиков индукционного типа для измерения напряжённости магнитного поля.

Объект исследования – индукторная система из 4-х одновитковых соленоидов прямоугольной формы из проводников с поперечным сечением $0,002 \text{ м} \times 0,002 \text{ м}$. Витки индуктора размещались в углах внутреннего профиля полой трубчатой алюминиевой заготовки. Изоляционные промежутки между токопроводами витков и стенками составляли $\approx 0,001 \text{ м}$.

На вход индуктора подавался синусоидальный ток с частотой $f \approx 20.6 \div 40.66 \text{ \AA}\ddot{\text{v}}$.

Вид экспериментальной модели в целом представлен на рис. 3.

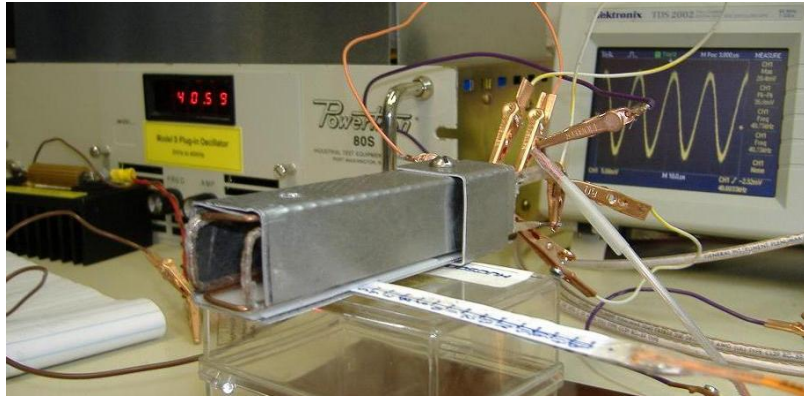


Рис. 3. Модель индукторной системы с 4-мя прямоугольными витками в полости трубчатой заготовки

Результаты проведенных измерений представлены графически на рис. 4. Экспериментальные картины пространственного распределения относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях квадратного профиля (нормировка производилась на максимальное значение напряжённости вблизи угла).

Проведенные измерения показали, что:

- экспериментальная форма пространственного распределения касательной составляющей напряжённости магнитного поля на рис.4 полностью согласуется с расчётной зависимостью, приведенной на рис. 1;

- пространственные распределения поля и, соответственно, токов, индуцированных в металле обрабатываемой заготовки, таковы, что их максимумы сосредоточены вблизи внутренних углов её внутреннего профиля, что реально подтверждает действительную концентрацию возбуждаемых усилий в угловых зонах на двух взаимно ортогональных плоскостях.

Выводы

1. Предложена конструкция индукторной системы для «раздачи» полых труб прямоугольного сечения.

2. Проведены модельные эксперименты и выполнены измерения пространственного распределения напряжённости при возбуждении магнитного поля четырьмя попарно компланарными прямоугольными витками. Результаты измерений согласуются с расчётными данными и подтверждают достоверность теоретических выводов.

3. Проведенные расчёты показали:

- максимумы пространственных распределений поля сосредоточены вблизи внутренних углов её внутреннего профиля;

- в предлагаемой индукторной системе должно иметь место возбуждение мощных равнодействующих сил давления, направленных к центрам углов;

- в предлагаемой индукторной системе, должно иметь место динамическое развитие процессов деформирования обрабатываемой заготовки за счёт её растяжения по углам профиля поперечного сечения.

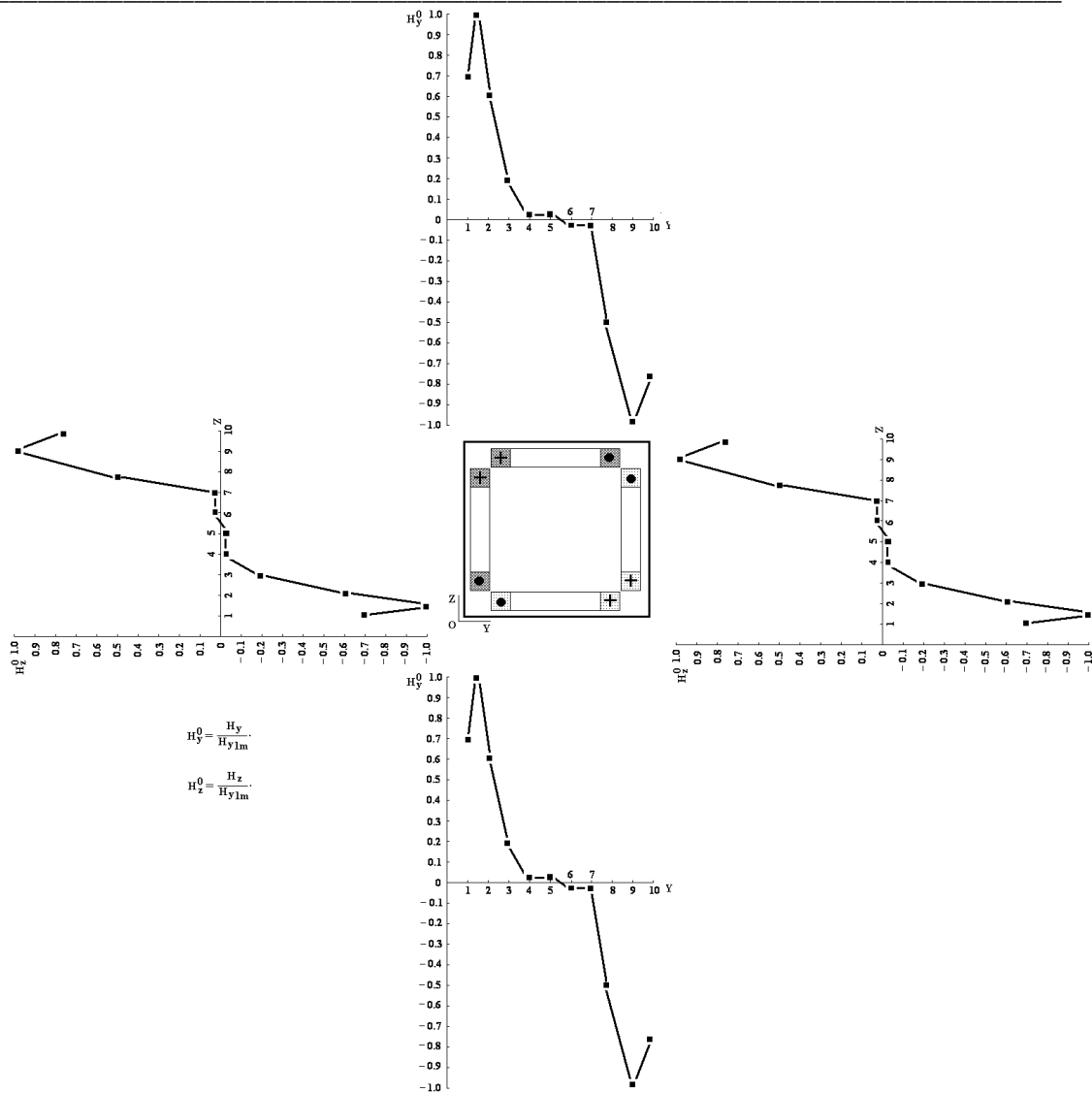


Рис. 4. Экспериментальные картины пространственного распределения относительной величины касательной компоненты напряжённости магнитного поля на угловых поверхностях квадратного профиля

1. Батыгин Ю.В., Головащенко С.Ф., А.В. Гнатов, Смирнов Д.О. Индукторные системы для магнитно-импульсной раздачи труб прямоугольной формы поперечного сечения. – Харьков: Електротехніка і електромеханіка, 2010. – №1 – С. 33 – 35.
2. Proceedings of the 1-st International Conference on High Speed Metal Forming. March 31/April 1. 2004. Dortmund, Germany.
3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Том 1. – Издание второе, переработанное и дополненное. Под общей редакцией д.т.н., проф. Батыгина Ю.В. – Харьков: Изд. "МОСТ", 2003. – 285 с.
4. Батыгин Ю.В., Сериков Г.С, Головащенко С.Ф. Магнитное поле и давления, возбуждаемые одновитковым индуктором в угловом изгибе листовой заготовки. – Харьков: Електротехніка і електромеханіка, 2006. – №6. – С.66-71.